doi:10.13866/j.azr.2019.04.24

近 3 a 内蒙古地区臭氧浓度时空变化及其影响因素①

陈志青[1]， 邵天杰[1]， 赵景波[1,2]

（1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院，陕西 西安 710119；
2. 中国科学院地球环境研究所气溶胶化学与物理重点实验室，陕西 西安 710061）

摘 要：为科学认识内蒙古地区臭氧(O_3)污染特征及其影响因素，对内蒙古地区 12 个盟市 2015—2017 年国控环境监测站点和国家气象台站数据进行了分析。结果表明：2017 年较 2015 年 O_3 浓度和污染形势整体上呈加重趋势，5—8 月 O_3 浓度最高，污染最为严重，且在 7 月达到 O_3 浓度峰值。空间变化上，内蒙古中西部地区 O_3 污染浓度较高，东部地区 O_3 污染浓度较低，与内蒙古的经济发展水平表现出一定的同步性。颗粒物、前体物和气象因素等都是影响 O_3 浓度的重要因子，其中，$PM_{2.5}$、CO、NO_2 均与 O_3 浓度呈显著负相关，O_3 浓度随相对湿度的升高逐渐下降。

关键词：臭氧浓度；颗粒物；时空变化；相对湿度；内蒙古

臭氧(O_3)是天然大气的重要微量成分，也是大气复合型污染最重要的特征污染物，是造成城市光化学烟雾污染的主要化学成分[1]，与 $PM_{2.5}$ 一起被认为是影响当今环境质量最重要的两种大气污染物[2-3]。O_3 是强氧化剂，近地面 O_3 浓度过高对生态环境和人体健康会带来直接危害，还会加速 $PM_{2.5}$ 等污染物的形成，进而加重大气重污染过程发生的频率和强度[4]。O_3 还是温室气体，近地面大气中 O_3 的含量和分布直接影响大气的热量平衡，进而影响局地和全球的气候变化[5]。光化学反应是城市近地面 O_3 的主要来源，近年来，随着经济的快速发展、人口的迅速增长，以及机动车保有量的快速增加，我国城市 O_3 污染问题越发严重，引起学者们的广泛关注。为全面认识 O_3 的污染规律，王雪松等[6]利用区域空气质量模式(CAMx)，结合 O_3 源识别技术(OSAT)和地区 O_3 评估技术(GOAT)，对北京地区 O_3 污染的化学机制特征进行了分析。严茹莎等[7]基于激光监测数据对北京市夏季 O_3 的时空分布特征和影响因子进行研究，认为 O_3 浓度在垂直空间上分布不均，上层气流中的 O_3 向下层气流的输送以及稳定边界层的存在都是引起 O_3 污染的重要原因。易睿等[8]对长江三角洲地区城市 O_3 污染特征与影响因素分析后指出，O_3 与颗粒物污染呈相反的变化态势；5—8 月是长三角地区 O_3 污染最为严重的月份；长三角地区的 O_3 污染具有连片性特征。曹庭伟等[9]对成渝城市群 O_3 污染特征及影响因素分析后指出，强辐射、高温及低湿易形成较高浓度的 O_3。程麟钧等[10]对 2013—2015 年京津冀区域 O_3 污染趋势进行了统计分析，结果表明京津冀区域 O_3 污染状况整体呈逐年加重的趋势。

目前，关于 O_3 时空分布特征及影响因素的研究主要集中在京津冀、长三角、珠三角等经济发达的地区[11-14]，对中西部省市研究较少。内蒙古地区地域广袤，所处纬度较高，日照充足，光能资源丰富，同时，丰富的矿产资源使得工业在经济发展中占有举足轻重的作用。特殊的地理位置和经济结构必然对内蒙古地区 O_3 的形成和时空分布产生影响，表现出独特的时空分异规律。因此，本文基于 2015—2017 年内蒙古 12 个盟市的国家空气质量监测站点的近地面污染物观测资料和相应的气象资料，对内蒙古地区 O_3 的时空分布规律及影响因素进行研究，以期为内蒙古地区的大气污染治理提供科学依据，同时也为深入了解中西部地区 O_3 的形成和分布提供借鉴。

① **收稿日期：**2018-09-25； **修订日期：**2019-03-11
基金项目：国家自然科学基金国际合作重大项目(41210002)；中国科学院气溶胶化学与物理重点实验室项目(KLACP-2018-01)
作者简介：陈志青(1983-)，女，博士生，主要从事生态学及大气环境研究. E-mail：zhiqing0616@163.com
通讯作者：邵天杰. E-mail：tjshao2010@126.com

1 数据与方法

1.1 资料来源

本文利用的 O_3 及其他相关污染物($PM_{2.5}$、PM_{10}、CO、NO_2)浓度监测数据来自中国环境监测总站全国城市空气质量实时发布平台(http://106.37.208.233:20035/),数据时间范围为 2015 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日。O_3 日评价指标采用 O_3 日最大 8 h 滑动平均浓度(以下简称为 O_3 -8 h),年评价指标为 O_3 日最大 8 h 滑动平均浓度第 90 百分位数(以下简称为 O_3 -8 h-90)。数据统计的有效性严格参照《环境空气质量标准》(GB3095 - 2012)[15]和《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ663 -2013)[16]执行,在计算 O_3 年均值和 O_3 -8 h-90 浓度时,若监测点 O_3 -8 h 数据少于 324 个,则认为该监测点全年数据无效并剔除;在计算 O_3 月均值时,若监测点当月 O_3 -8 h 数据少于 27 个(2 月少于 25 个),则认为当月数据无效并剔除。本研究中 12 个盟市的 O_3 浓度年实际有效监测天数为 342 ~366 d,符合国家评价技术规范。为保证数据的完整性和可比性,在计算年均值和月均值时对有效数据的缺失部分进行插值。气象资料使用中国气象科学数据共享网(http://cdc.cma.gov.cn)的中国地面气象资料日值数据集。在充分考虑数据完整性和代表性等因素后,每个城市选取 1 个台站的气象要素数据,数据及原始数据文件已经过严格的质量控制和检查。

1.2 研究方法

O_3 评价标准按照《环境空气质量标准》(GB3095 -2012)[15]中关于 O_3 的二级标准,即 O_3 -8 h 超过 160 $\mu g \cdot m^{-3}$,为 O_3 日评价指标超标,O_3 -8 h-90 超过 160 $\mu g \cdot m^{-3}$为 O_3 年评价指标超标。

各污染物、气象因子与 O_3 浓度的相关性均采用 SPSS 软件中的 Spearman 相关性分析完成,并采用 ArcGIS 软件对内蒙古地区的 O_3 浓度进行空间分析。

2 结果与分析

2.1 O_3 浓度的时间变化特征

2.1.1 O_3 浓度的年际变化特征　由表 1 和图 1 可知,2015 年,O_3 -8 h-90 变化范围为 81 ~160 $\mu g \cdot m^{-3}$,平均值为 133 $\mu g \cdot m^{-3}$,比全国平均值 134 $\mu g \cdot m^{-3}$低 0.7%。12 个盟市中仅鄂尔多斯市 O_3 -8 h-90 达到 160 $\mu g \cdot m^{-3}$,O_3 年评价结果为超标。乌兰察布市、阿拉善盟、包头市和通辽市 4 个城市 O_3 -8 h-90 为 150 ~160 $\mu g \cdot m^{-3}$,其余城市均低于 150 $\mu g \cdot m^{-3}$,锡林郭勒盟 O_3 -8 h-90 最低(81 $\mu g \cdot m^{-3}$)。O_3 超标天数占监测天数的 4.3%,超标天数最多的城市是鄂尔多斯市(36 d),其次是乌兰察布市(32 d),锡林郭勒盟和呼伦贝尔市没有出现超标。2016 年,O_3 -8 h-90 变化范围为 104 ~153 $\mu g \cdot m^{-3}$,平均值为 135 $\mu g \cdot m^{-3}$,比全国平均值 138 $\mu g \cdot m^{-3}$ 低 2.2%,比 2015 年上升 1.5%。其中,鄂尔多斯市和阿拉善盟 O_3 -8 h-90 最高,为 153 $\mu g \cdot m^{-3}$,12 个城市 O_3 年评价结果均未超标。O_3 超标天数占监测天数的 3.9%,超标天数最多的城市是鄂尔多斯市(27 d),其次是呼和浩特市、包头市、通辽市。2017 年,O_3 -8 h-90 变化范围为111 ~167 $\mu g \cdot m^{-3}$,平均值为 142 $\mu g \cdot m^{-3}$,比全国平均值 167 $\mu g \cdot m^{-3}$低 15.0%,比 2016 年上升 5.2%。其中,乌兰察布市 O_3 -8 h-90 为 167 $\mu g \cdot m^{-3}$,呼和浩特市 O_3 -8 h-90 为 165 $\mu g \cdot m^{-3}$,2 个城市 O_3 年评价结果均超标。鄂尔多斯市 O_3 -8 h-90 为 158 $\mu g \cdot m^{-3}$,年评价结果接近超标。O_3 超标天数占监测天数的 6.0%,比 2016 年上升 53.8%。超标天数最多的城市是乌兰察布市,O_3 超标天数为 51 d,其次是呼和浩特市,O_3 超标天数为 42 d。

总体来看,2015—2017年内蒙古地区 12个盟

表 1　2015—2017 年内蒙古地区 O_3 浓度及气象条件

Tab. 1　Meteorological conditions and O_3 concentration in Inner Mongolia during the period of 2015 -2017

年份	平均温度 /℃	平均湿度 /%	年均降水量 /mm	O_3 -8 h 平均值 /($\mu g \cdot m^{-3}$)	O_3 -8 h-90 浓度平均值 /($\mu g \cdot m^{-3}$)	O_3 超标天数比例/%
2015	6.77	50.78	295.55	87	133	4.3
2016	6.47	50.67	377.18	92	135	3.9
2017	7.06	46.95	264.85	97	142	6.0

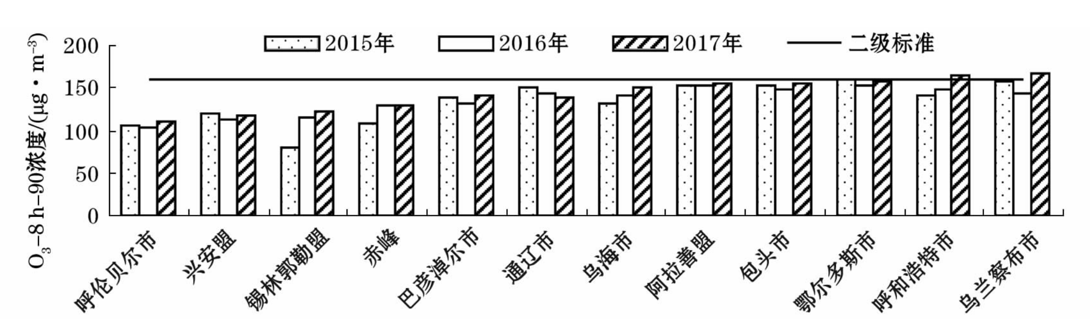


图 1 2015—2017 年内蒙古地区各城市 O_3 - 8 h - 90 浓度

Fig. 1 O_3 - 8 h - 90 in the cities in Inner Mongolia during the period of 2015 - 2017

市 O_3 污染程度呈逐年上升趋势。O_3 年评价结果超标的城市数量由 2015 年的 1 个增加为 2017 年的 2 个。2016 年的 O_3 - 8 h - 90 增加,超标天数比例却减少,这主要是由气象条件造成的,气象条件的变化通常会引起空气污染浓度较大幅度的变化[17]。从表 1 可以看出,2016 年的平均温度在 3 a 中最低,年均降水量在 3 a 中最高,较低的温度和较高的降水量均不利于高浓度 O_3 的生成和积累。

2.1.2 O_3 浓度的月变化特征 受 O_3 前体物浓度和气象条件(气温、相对湿度、日照时数等)的影响,内蒙古地区 O_3 月均浓度呈倒“V”形单峰变化(图 2),1—6 月 O_3 月均浓度逐渐升高,并于 7 月达到峰值 131 μg·m^{-3}。8—12 月 O_3 月均浓度逐渐下降,并在 12 月达到最低值 55 μg·m^{-3}。这与长三角城市群、成渝城市群等 O_3 月均浓度变化曲线呈“M”形不同,内蒙古地区降水较少,降水量对 O_3 浓度下降的贡献远低于温度和太阳辐射对生成 O_3 光化学反应的促进作用。5—8 月 O_3 浓度最高,是污染最严重的时期,即春末和夏季污染最为严重。O_3 超标天数的月分布与月浓度均值变化趋势相似,在 O_3 污染最为严重的月份,超标天数也最多,即 7 月超标天数全年最高达到 77 d。1 月、2 月、11 月和 12 月均未出现 O_3 浓度超标。O_3 的生成与太阳辐射、高温等气象因素密切相关,内蒙古地区属于温带大陆性季风气候,春末气温骤升,夏季炎热,秋季气温剧降,5—8 月为夏至前后,日照时间全年最高,太阳辐射量全年最大,强太阳辐射和高温等有利的气象条件增加了光化学反应的发生速率,生成高浓度的 O_3。9—4 月由于辐射强度、温度等均较低,大气活性较弱,不利于光化学反应的发生,O_3 浓度较低。

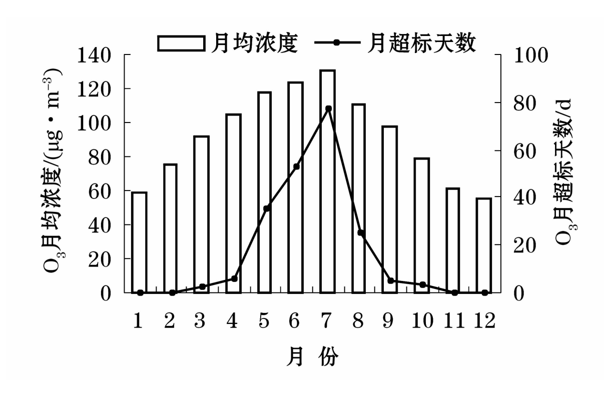


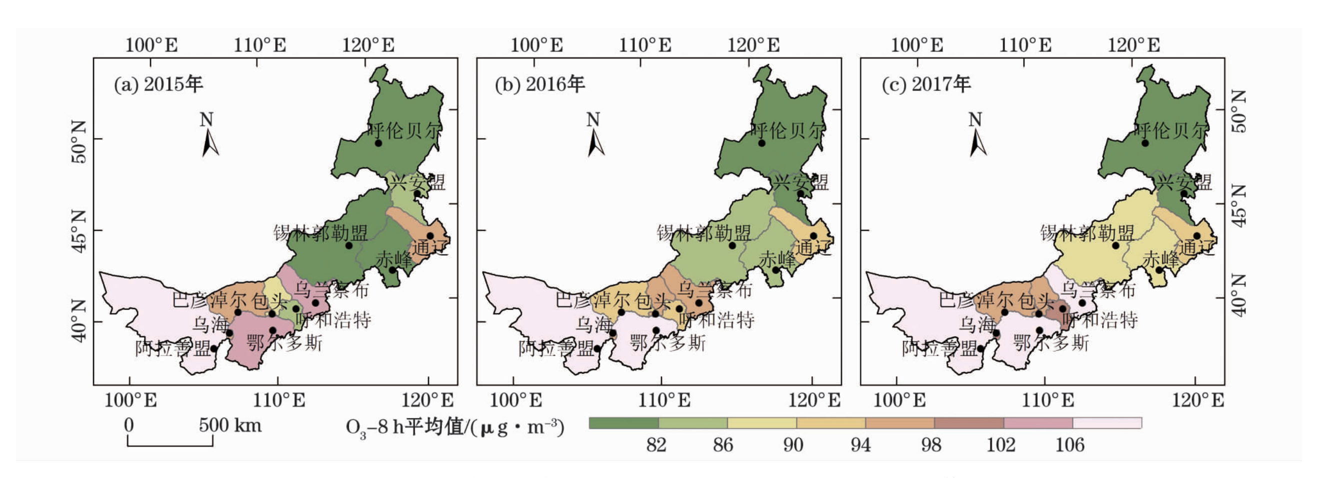
图 2 2015—2017 年内蒙古地区 O_3 浓度与超标天数月均分布

Fig. 2 Monthly average distribution of O_3 concentration and over standard days in Inner Mongolia during the period of 2015 - 2017

2.2 O_3 浓度的空间分布特征

为进一步对比分析 2015—2017 年内蒙古地区 12 个盟市 O_3 浓度的空间变化特征,基于 ArcGIS 软件采用克里金插值法,对 12 个盟市的 O_3 - 8 h 年均值和 O_3 - 8 h - 90 进行了空间插值,得到 O_3 浓度空间分布图(图 3 和图 4)。整体来看,2015—2017 年内蒙古地区 O_3 的空间分布格局变化不大,O_3 浓度呈中西部高东部低的特点。由图 3 可见,O_3 - 8 h 年均值的高值区主要分布在阿拉善盟、鄂尔多斯市、乌兰察布市等中西部地区。O_3 - 8 h 年均值低值区主要分布在呼伦贝尔市、赤峰市、锡林郭勒盟、兴安盟等东部地区。由图 4 可知,2015—2017 年 O_3 - 8 h - 90 的高值区主要分布在鄂尔多斯市、乌兰察布市、阿拉善盟、呼和浩特市和包头市等中西部地区,低值区主要分布在呼伦贝尔市、锡林郭勒盟、兴安盟等东部地区。

2016 年较 2015 年 O_3 - 8 h 年均值升高明显的城市有锡林郭勒盟和赤峰市,O_3 - 8 h 年均值分别由 60、62 μg·m^{-3}上升到 83 μg·m^{-3}。2017 年较 2016 年 O_3 - 8 h 年均值升高明显的城市为乌兰察布市,O_3 - 8 h 年均值由 94 μg·m^{-3}上升到 114 μg·m^{-3}。2017 年较 2015 年 O_3 - 8 h 年均值升高



注:地理底图源自中国政区图〔审图号:GS(2016)2923 号〕,未对边界进行修改。下同。

图 3 2015—2017 年内蒙古地区 O_3 -8 h 年均值的空间变化

Fig. 3 Spatial variation of O_3 -8 h annual means in Inner Mongolia during the period of 2015 -2017

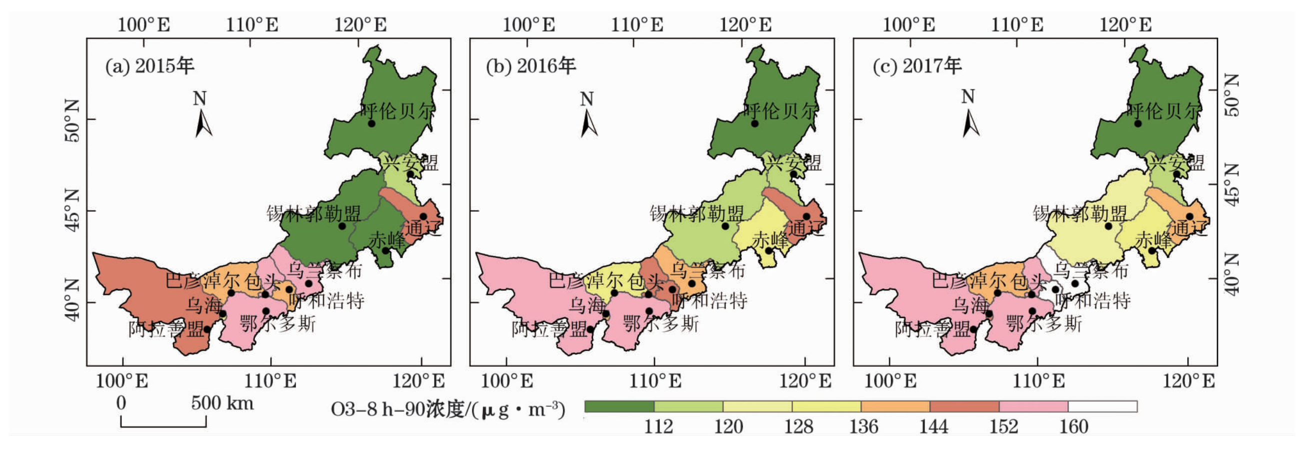


图 4 2015—2017 年内蒙古地区 O_3 -8 h -90 的空间变化

Fig. 4 Spatial variation of O_3 -8 h -90 in Inner Mongolia during the period of 2015 -2017

明显的城市有锡林郭勒盟(60 ~ 90 μg·m^{-3})、赤峰市(62 ~ 86 μg·m^{-3})、呼和浩特市(82 ~ 101 μg·m^{-3})、乌兰察布市(102 ~ 114 μg·m^{-3})、鄂尔多斯市(102 ~ 112 μg·m^{-3})。其中,阿拉善盟、巴彦淖尔市、包头市、呼伦贝尔市、通辽市、乌海市和兴安盟 O_3 浓度呈波动变化且变化不明显。2015—2017 年 O_3 -8 h -90 明显升高的城市与 O_3 -8 h 年均值变化区域相同。总体来看,锡林郭勒盟和赤峰市 O_3 浓度在 2015—2017 年上升较快,O_3 前体物排放量的增加可能是 O_3 浓度迅速增加的重要原因。内蒙古地区 2015—2017 年 O_3 -8 h 年均值和 O_3 -8 h -90 的高值区主要分布在中西部地区,低值区主要分布在东部地区,这与内蒙古地区的经济发展水平表现出一定的同步性[18]。内蒙古的中部地区包括呼和浩特市、鄂尔多斯市、包头市和乌兰察布市,是内蒙古经济发展最快的城市群,快速的经济发展增加了 O_3 前体物的人为排放源。同时,内蒙古中部地区与京津冀地区临近,春末夏初,强烈的东南风可能会将京津冀地区较高浓度的 O_3 输送到内蒙古。内蒙古地区全年的辐射量从东北向西南递增,使得中西部地区的光化学反应较东部地区活跃,东部地区较低的温度会降低光化学反应的发生速率,使得东部地区的 O_3 浓度较中西部地区低。

3 讨 论

3.1 颗粒物对 O_3 浓度的影响

由图 5 可知,$PM_{2.5}$、PM_{10}浓度和 O_3 浓度均呈负相关。对内蒙古地区大气复合污染类型中颗粒物 $PM_{2.5}$、PM_{10}浓度和 O_3 浓度进一步进行 Spearman 相关分析,发现 $PM_{2.5}$、PM_{10}与 O_3 浓度的相关系数分别为 -0.814 和 -0.289,并且 $PM_{2.5}$浓度与 O_3 浓度的相关系数通过了双侧 0.01 水平的显著性检验,PM_{10}

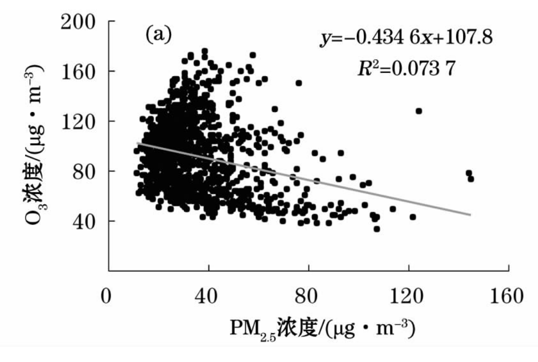
浓度与 O_3 浓度的相关性不显著。由于颗粒物尤其是 $PM_{2.5}$浓度的升高会导致气溶胶光化学厚度增大，降低消光系数，削弱大气辐射，从而抑制 O_3 的光化学生成率[19]。这与杨冕等[20]的研究结果相反，可能与所选地区不同的环境气候条件有关。前人研究发现，颗粒物和 O_3 虽然属于不同类型的空气污染物，但两者在不同的环境气候条件下可能存在着多种相互作用机制。颗粒物表面的非均相化学过程会抑制 O_3 的光化学生成率[21]；大气中高浓度的 O_3 通过强烈的氧化作用，会促进细颗粒物的二次生成来提高 $PM_{2.5}$的水平，以上不同的作用机制在不同的环境气候条件下分别发挥主导作用。可见，空气污染的治理必须根据污染物之间的作用规律联防联控。

3.2 O_3 浓度与前体物 CO、NO_2 浓度的相关分析

O_3 主要由人类活动排放的 NO_X、CO、VOCS 等前体物在合适的气象条件下经光化学反应生成[22]。从图 6 可以看出，CO、NO_2 的日监测值均与 O_3 浓度呈负相关，这与前人的研究结果相一致[23]。生成 O_3 的光化学反应在温度较高，太阳辐射较强时，反应强度增大，导致 O_3 浓度升高，CO、NO_2 等前体物浓度降低；当温度较低，太阳辐射较弱时，生成 O_3 的光化学反应被削弱，导致 CO、NO_2 等前体物浓度积累。此外，从前述对 O_3 浓度的月变化特征分析可知，O_3 浓度在冬季较低，而内蒙古地区冬季气温较低，大气层结构稳定，对流不活跃，不利于污染物的局地传输及稀释扩散，从而导致 CO、NO_2 等在大气底层累积。进一步计算 Spearman 相关系数可知，O_3 浓度与 CO、NO_2 的相关系数分别为 -0.906 和 -0.954，并且均在 0.01 水平上显著相关。

3.3 O_3 浓度与相对湿度的相关分析

从表 2 可以看出，随着相对湿度（RH）的增加，超标频率呈先升后降的变化趋势。在 $RH<60\%$ 时，O_3 超标频率随相对湿度的增加而上升；$RH\geq60\%$ 时，O_3 超标频率随相对湿度的增加而明显下降；在 $RH\geq90\%$ 时，没有出现超标。表明较高的相对湿度不利于 O_3 的生成。较高的水汽会产生消光机制，使光化学反应衰减[24]。另外，较高的湿度有利于 O_3 的干沉降，从而达到清除 O_3 的作用。O_3 浓度均值与超标频率的变化不同，在 $RH\leq40\%$ 时，O_3 浓度均值达到最大，之后随着相对湿度的增加逐渐减小，这与其他人的研究结果不太一致，可能与所选地区有关，需要进一步的研究。在 $RH\leq40\%$ 时，O_3浓度



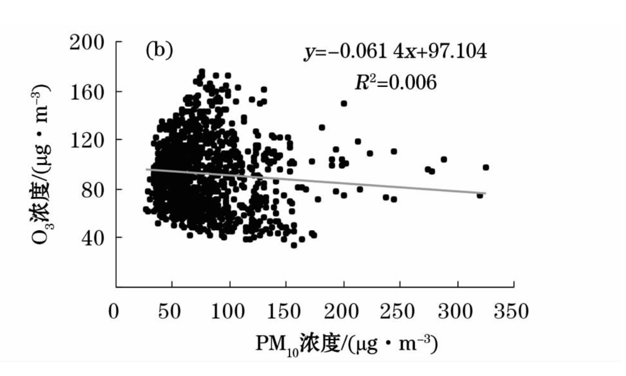


图 5 内蒙古地区 2015—2017 年 O_3 与 $PM_{2.5}$、PM_{10}的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis among O_3, $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Inner Mongolia during the period of 2015 - 2017

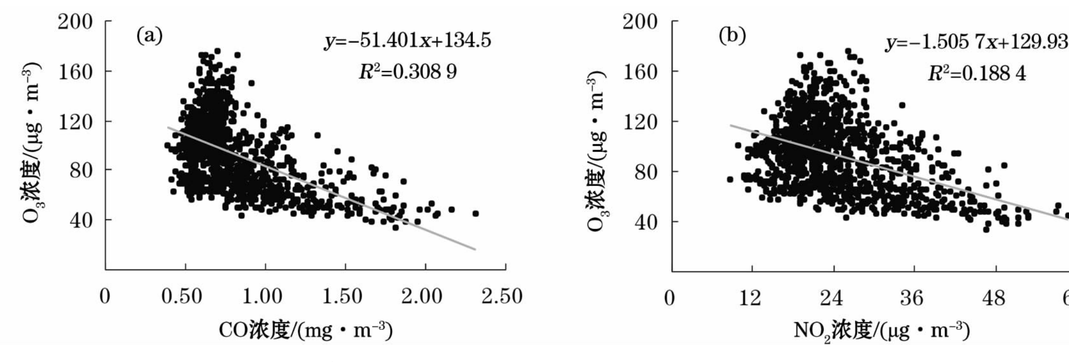


图 6 内蒙古地区 2015—2017 年 O_3 与 CO、NO_2 的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis among O_3, CO and NO_2 in Inner Mongolia during the period of 2015 - 2017

表 2 2015—2017 年内蒙古不同相对湿度下 O_3 超标频率和浓度均值

Tab. 2 Over standard rate of O_3 and average concentration in different relative humidity

相对湿度 (*RH*)/%	O_3 超标天数/d	监测天数/d	O_3 超标天数比例/%	O_3 浓度均值 /(μg·m^{-3})
$RH \leqslant 40$	267	5 267	5.07	99.33
$40 < RH \leqslant 50$	125	2 268	5.51	91.73
$50 < RH \leqslant 60$	131	2 080	6.30	90.67
$60 < RH \leqslant 70$	77	1 757	4.38	87.16
$70 < RH \leqslant 80$	19	1 209	1.57	79.72
$80 < RH \leqslant 90$	5	454	1.10	80.37
$RH \geqslant 90$	0	94	0.00	66.80

均值最高(99.33 μg·m^{-3}),O_3 超标天数比例却不高。可能与内蒙古地区春季相对湿度最低和夏季降水集中有关。相对湿度最低的春季,O_3 浓度高值不多,但 O_3 浓度在 100 μg·m^{-3}以上的天数较多,提高了 O_3 浓度均值。夏季相对集中的降水提高了相对湿度,但更高的太阳辐射和温度为 O_3 的光化学反应提供了有利的条件,O_3 浓度高值出现较多。

4 结 论

(1) 2015—2017 年内蒙古地区 12 个盟市 O_3 日最大 8 h 滑动平均值超过《环境空气质量标准》(GB3095－2012)二级标准的累计天数为 624 d,占总有效监测天数(12 个盟市 2015—2017 年有效监测天数累计为 13 148 d)的 4.7%。O_3 污染整体呈逐年上升的趋势,5—8 月是 O_3 污染最严重的月份。

(2) 内蒙古地区 O_3 浓度存在明显的空间差异,中西部地区 O_3 浓度较高,东部地区 O_3 浓度较低。这与内蒙古地区的经济发展水平表现出一定的同步性。

(3) O_3 与 $PM_{2.5}$、PM_{10}之间在复杂的大气复合污染类型中存在不同的相互作用机制,在内蒙古地区,$PM_{2.5}$、PM_{10}与 O_3 浓度均呈负相关,且 O_3 浓度与 $PM_{2.5}$在 0.01 水平上显著负相关。前体物 CO、NO_2 与 O_3 浓度呈显著负相关。

(4) 相对湿度对 O_3 浓度具有一定的湿清除作用,较高的相对湿度还会减弱光化学反应程度,因此,随相对湿度的增加,O_3 浓度逐渐减小。

参考文献(References):

〔1〕 陈仁杰,陈秉衡,阚海东. 上海市近地面臭氧污染的健康影响评价〔J〕. 中国环境科学,2010,30(5):603－608.〔Chen Renjie,Chen Bingheng,Kan Haidong. Health impact assessment of surface ozone pollution in Shanghai〔J〕. China Environmental Science,2010,30(5):603－608.〕

〔2〕 张小曳,孙俊英,王亚强,等. 我国雾－霾成因及其治理的思考〔J〕. 科学通报,2013,58(13):1 178－1 187.〔Zhang Xiaoye,Sun Junying,Wang Yaqiang,et al. Factors contributing to haze and fog in China〔J〕. Chinese Science Bulletin,2013,58(13):1 178－1 187.〕

〔3〕 同丽嘎,李雪铭,张靖,等. 包头市典型城市绿地及周边 $PM_{2.5}$ 对比分析〔J〕. 干旱区研究,2018,35(3):562－567.〔Tong Liga,Li Xueming,Zhang Jing,et al. $PM_{2.5}$ concentration over typical urban green spaces in Baotou City and its peripheral regions〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(3):562－567.〕

〔4〕 唐孝炎,张远航,邵敏. 大气环境化学〔M〕. 北京:高等教育出版社,2006.〔Tang Xiaoyan,Zhang Yuanhang,Shao Min. Atmospheric Environmental Chemistry〔M〕. Beijing:Higher Education Press,2006.〕

〔5〕 王雪梅,韩志伟,雷孝恩. 广州地区臭氧浓度变化规律研究〔J〕. 中山大学学报(自然科学版),2003,42(4):106－109.〔Wang Xuemei,Han Zhiwei,Lei Xiaoen. Study on ozone concentration change of Guangzhou district〔J〕. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni(Natural Science Edition),2003,42(4):106－109.〕

〔6〕 王雪松,李金龙,张远航,等. 北京地区臭氧污染的来源分析〔J〕. 中国科学,2009,39(6):548－559.〔Wang Xuesong,Li Jinlong,Zhang Yuanhang,et al. Ozone source attribution during a severe photochemical smog episode in Beijing,China〔J〕. Science in China,2009,39(6):548－559.〕

〔7〕 严茹莎,陈敏东,高庆先,等. 北京夏季典型臭氧污染分布特征及影响因子〔J〕. 环境科学研究,2013,26(1):43－49.〔Yan Rusha,Chen Mindong,Gao Qingxian,et al. Characteristics of typical ozone pollution distribution and impact factors in Beijing in summer〔J〕. Research of Environmental Sciences,2013,26(1):43－49.〕

〔8〕 易睿,王亚林,张殷俊,等. 长江三角洲地区城市臭氧污染特征与影响因素分析〔J〕. 环境科学学报,2015,35(8):2 370－2 377.〔Yi Rui,Wang Yalin,Zhang Yinjun,et al. Pollution characteristics and influence factors of ozone in Yangtze River Delta〔J〕. Acta Scientiae Circumstantiae,2015,35(8):2 370－2 377.〕

〔9〕 曹庭伟,吴锴,康平,等. 成渝城市群臭氧污染特征及影响因素分析〔J〕. 环境科学学报,2018,38(4):1 275－1 284.〔Cao Tingwei,Wu Kai,Kang Ping,et al. Study on ozone pollution characteristics and meteorological cause of Chengdu-Chongqing urban agglomeration〔J〕. Acta Scientiae Circumstantiae,2018,38(4):1 275－1 284.〕

〔10〕 程麟钧,王帅,宫正宇,等. 京津冀区域臭氧污染趋势及时空分布特征〔J〕. 中国环境监测,2017,33(1):14－21.〔Cheng Linjun,Wang Shuai,Gong Zhengyu,et al. Pollution trends of ozone and its characteristics of temporal and spatial distribution in Beijing-Tianjin-Hebei Region〔J〕. Environmental Monitoring in China,2017,33(1):14－21.〕

〔11〕 姚青,孙玫玲,刘爱霞. 天津臭氧浓度与气象因素的相关性及其预测方法〔J〕. 生态环境学报,2009,18(6):2 206－2 210.〔Yao Qing,Sun Meiling,Liu Aixia. Analysis and prediction of surface ozone concentration and related meteoro-logical factors in summer in Tianjin〔J〕. Ecology and Environmental Sciences,2009,18(6):2 206－2 210.〕

〔12〕刘芷君,谢小训,谢旻,等.长江三角洲地区臭氧污染时空分布特征〔J〕.生态与农村环境学报,2016,32(3):445－450.〔Liu Zhijun,Xie Xiaoxun,Xie Min,et al. Spatio-temporal distribution of ozone pollution over Yangtze River delta region〔J〕. Journal of Ecology and Rural Environment,2016,32(3):445－450.〕
〔13〕廖志恒,孙家仁,范绍佳,等.2006—2012年珠三角地区空气污染变化特征及影响因素〔J〕.中国环境科学,2015,35(2):329－336.〔Liao Zhiheng,Sun Jiaren,Fan Shaojia,et al. Variation characteristics and influencing factors of air pollution in Pearl River delta area from 2006 to 2012〔J〕. China Environmental Science,2015,35(2):329－336.〕
〔14〕宋从波,李瑞芃,何建军,等.河北廊坊市区大气中 NO、NO_2 和 O_3 污染特征研究〔J〕.中国环境科学,2016,36(10):2 903－2 912.〔Song Congbo,Li Ruipeng,He Jianjun,et al. Analysis of pollution characteristics of NO,NO_2 and O_3 at urban area of Langfang,Hebei〔J〕. China Environmental Science,2016,36(10):2 903－2 912.〕
〔15〕中国环境科学研究院.环境空气质量标准〔M〕.北京:中国环境科学出版社,2012.〔China Academy of Environmental Sciences. Ambient Air Quality Standards〔M〕. Beijing:China Environmental Science Press,2012.〕
〔16〕环境保护部科技标准司.环境空气质量评价技术规范(试行):HJ663－2013〔S〕.北京:中国环境科学出版社,2013.〔Department of Science and Technology Standards,Ministry of Environmental Protection. Technical Specifications for Environmental Air Quality Assessment (Trial):HJ663－2013〔S〕. Beijing:China Environmental Science Press,2013.〕
〔17〕吴宜航,白鹤鸣,师华定,等.气象条件对呼和浩特市空气质量变化的影响评估〔J〕.干旱区研究,2016,33(2):292－298.〔Wu Yihang,Bai Heming,Shi Huading,et al. Assessing the influence of weather conditions on the change of air quality in Hohhot〔J〕. Arid Zone Research,2016,33(2):292－298.〕
〔18〕王芳,高晓路.内蒙古县域经济空间格局演化研究〔J〕.地理科学,2014,34(7):818－824.〔Wang Fang,Gao Xiaolu. Spatial pattern evolvement of the economy in Inner Mongolia at the county level〔J〕. Geographic Science,2014,34(7):818－824.〕
〔19〕Jia M,Zhao T,Cheng X,et al. Inverse relations of $PM_{2.5}$ and O_3 in air compound pollution between cold and hot seasons over an urban area of East China〔J〕. Atmosphere,2017,8(3):59.
〔20〕杨冕,王银.长江经济带 $PM_{2.5}$ 时空特征及影响因素研究〔J〕.中国人口·资源与环境,2017,27(1):91－100.〔Yang Mian,Wang Yin. Spatial-temporal characteristics of $PM_{2.5}$ and its influencing factors in the Yangtze River economic belt〔J〕. China Population,Resources and Environment,2017,27(1):91－100.〕
〔21〕蔡彦枫,王体健,谢旻,等.南京地区大气颗粒物影响近地面臭氧的个例研究〔J〕.气候与环境研究,2013,18(2):251－260.〔Cai Yanfeng,Wang Tijian,Xie Min,et al. Impacts of atmospheric particles on surface ozone in Nanjing〔J〕. Climatic and Environmental Research,2013,18(2):251－260.〕
〔22〕Tang G,Li X,Wang Y,et al. Surface ozone trend details and interpretations in Beijing,2001－2006〔J〕. Atmospheric Chemistry & Physics,2009,9(22):8 813－8 823.
〔23〕南国卫,孙虎.2016年陕西省 O_3 浓度时空变化规律〔J〕.干旱区资源与环境,2018,32(5):183－190.〔Nan Guowei,Sun Hu. Spatial and temporal characteristics of O_3 in Shaanxi Province in 2016〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2018,32(5):183－190.〕
〔24〕刘晶淼,丁裕国,黄永德,等.太阳紫外辐射强度与气象要素的相关分析〔J〕.高原气象,2003,22(1):45－50.〔Liu Jingmiao,Ding Yuguo,Huang Yongde,et al. Correlation analyses between intensity of solar ultraviolet radiation and meteorological elements〔J〕. Plateau Meteorology,2003,22(1):45－50.〕

Spatiotemporal Variation of Ozone Concentration and Its Influential Factors in Inner Mongolia in Recent 3 Years

CHEN Zhi-qing[1], SHAO Tian-jie[1], ZHAO Jing-bo[1,2]

(1. *School of Geography and Tourism*, *Shaanxi Normal University*, *Xi'an* 710119, *Shaanxi*, *China*;
2. *Key Laboratory of Aerosol Chemistry and Physics*, *Institute of Earth Environment*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xi'an* 710061, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: In order to study the O_3 pollution in Inner Mongolia and its influential factors, the data from the national environmental monitoring stations and national meteorological stations in 12 cities in Inner Mongolia from 2015 to 2017 were analyzed. The overall O_3 pollution in 2017 was aggravated compared with that in 2015 and the O_3 concentration was the highest and the most serious during the period from May to August, especially in July. Spatially, the O_3 pollution was relatively more serious in the central and western parts of Inner Mongolia, while lower in the east parts which was synchronous with the economic development level. Particles, precursors and meteorological factors were the important factors affecting O_3 concentration. There were the significantly negative correlations between the O_3 concentration and the $PM_{2.5}$, CO and NO_2, and the O_3 concentration decreased gradually with the increase of relative humidity.

Key words: ozone concentration; particulate matter; spatiotemporal variation; relative humidity; Inner Mongolia